

dr inż. Krzysztof Marcinczak¹⁾
ORCID: 0000-0002-8789-5243

Residual stresses in steel I-sections after cold forming about strong axis

Naprężenia własne w walcowanych dwuteownikach stalowych po formowaniu na zimno względem silnej osi bezwładności

DOI: 10.15199/33.2025.05.05

Abstract. This article presents the issue of self stresses and the methods for determining them. Describes the methodology of using the hole drilling method to determine the residual stresses occurring in cold bended I beams to the strong axis. The results of a study of the residual stresses in a steel I beam made of S460M steel are presented. The resulting stress distributions are compared with theoretical models.

Keywords: residual stresses, hole-drilling method, semi-destructive tests, cold bending.

Streszczenie. W artykule omówiono zagadnienie naprężeń własnych oraz metody ich określania. Opisano metodę wykorzystania metody otworkowej do określenia naprężeń własnych występujących w dwuteownikach giętych na zimno względem silnej osi bezwładności. Przedstawiono wyniki badań naprężeń własnych w stalowej belce dwuteowej ze stali S460M. Otrzymane rozkłady naprężeń porównano z modelami teoretycznymi.

Słowa kluczowe: naprężenia własne, metoda otworkowa, badania półniszczące, gięcie na zimno.

Cold-bent steel sections are used extensively in the construction industry, for example in long-span diaphragm structures, curved bridge girders or steel structures with sophisticated shapes. Cold bending is used to give curved shapes to components and to cambering. In practice, two cold bending technologies are most commonly used – point and roll bending [1].

This paper discusses the residual stresses occurring in I-beams after cold bending about the strong axis. The results of a study aimed at determining the self-stresses in hot-rolled I-beams after cold bending are presented. The results obtained are compared with stress distributions proposed in the literature.

Previous research has mainly focused on the determination of rolling stress distributions in straight sections. The publication [2] summarises the most important papers, mainly from studies of sections made of steels with yield strengths of 235–355 MPa (85 studies from all over the world from 1959 to 2021 were collated). Rolling stress studies, in the case of S460 steel sections, are presented in papers [3] and [4], among others, and in [5] modern, thick-walled S460 steel sections. In papers [6, 7], investigations of the residual stresses in rolled I-sections from S235 and S355 steel after cold forming are described. Therefore, a research topic was undertaken on the residual stresses after cold-forming of I sections made of S460 steel.

Residual stresses

Initial stresses, also referred to as residual stresses, are internal stresses that exist in the material and component independently of external loads. These stresses self-equilibrate in such

Kształtowniki stalowe poddane gięciu na zimno są powszechnie stosowane w budownictwie, np. w konstrukcjach przekryć dużych rozpiętości, łukowych dźwigarach mostowych lub w konstrukcjach stalowych o wyrafinowanych kształtach. Gięcie na zimno stosowane jest do nadawania łukowych kształtów elementom oraz do podniesienia wykonawczego. W praktyce najczęściej stosuje się dwie technologie gięcia na zimno – punktowe i rolkowe [1].

W artykule omówiono naprężenia własne występujące w dwuteownikach po gięciu na zimno względem silnej osi bezwładności. Przedstawiono wyniki badań, których celem było określenie naprężeń własnych w gorącowalcowanych dwuteownikach po gięciu na zimno. Uzyskane wyniki porównano z rozkładami naprężeń proponowanymi w literaturze przedmiotu.

Dotychczasowe badania skupiały się przede wszystkim na określeniu rozkładów naprężeń walcowniczych w elementach prostych. W publikacji [2] zestawiono najważniejsze prace, głównie z badań kształtowników ze stali z granicą plastyczności 235–355 MPa (zestawiono 85 badań z całego świata od 1959 do 2021 r.). Badania naprężeń walcowniczych, w przypadku kształtowników ze stali S460, przedstawiono m.in. w pracach [3] i [4], a w [5] nowoczesnych, grubościennych kształtowników ze stali S460. W pracach [6, 7] opisano badania naprężeń własnych w walcowanych dwuteownikach ze stali S235 i S355 po formowaniu na zimno. W związku z tym podjęto tematykę badawczą dotyczącą naprężeń własnych po formowaniu na zimno dwuteowych kształtowników wykonanych ze stali S460.

Naprężenia własne

Naprężenia własne, nazywane również resztkowymi lub rezidualnymi, to wewnętrzne naprężenia występujące w materiale i elemencie niezależnie od obciążeń zewnętrznych.

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; krzysztof.marcinczak@pwr.edu.pl

a way that the sum of the compressive and tensile stresses in a given cross-section of an element is zero [8]. The self-balancing stresses must satisfy the following equilibrium conditions:

$$\iint_A \sigma \cdot dA = 0 \quad (1)$$

$$\iint_A \sigma \cdot y \cdot dA = 0 \quad (2)$$

where:

A – cross-sectional area of the element

σ – the component of self-stress normal to the cross-section A

y – coordinate defining the distance from the neutral plane

Almost all manufacturing processes of steel components induce intrinsic stresses in the cross-sections of these components. In addition, these stresses may occur during the service life of the component. The following processes during which residual stresses arise:

- 1) uneven plastic deformation – technological processes that change the shape of a component, e.g. forging, rolling, bending, drawing, stretching, straightening, as well as surface deformation of material in bearings and railway rails, among others;
- 2) surface modification – grinding, plating, shot peening, carburizing, as well as corrosion and oxidation;
- 3) phase transformation of the material or change in density – welding, casting, hardening, hardening, uneven heating or cooling.

The residual stresses can be divided into three types according to [9,10]:

- Type I: Macro stresses, balancing in the volume of the whole element. The range of this type of stress extends from 1 mm upwards – to the limits of the entire element cross-section.
- Type II: Micro stresses that balance out in the volume of single grains of polycrystalline metals.
- Type III: Stresses that occur on an atomic scale.

Knowledge of Type I stresses is of most interest to structural engineers and most measurement techniques can determine them.

Stress measurement methods can be divided into destructive, semi-destructive and non-destructive methods. The article describes in detail the hole-drilling method, which is classified as a semi-destructive method. A detailed description of all methods is presented in [9].

Cold forming

Cold forming of steel components is usually carried out using three-point bending. In practice, a cold roll bending machine is equipped with four rollers – two external rollers, one central roller and a smaller roller holding the flange and web. In this technology, usually one of the outermost rollers is moved by an actuator to bend the beam (Figure 1). The first section of the component to be bent, with a length equal to the distance of the outer roller to the central roller, remains straight and is the waste cut off after the whole component has been bent. This method can be used to bend any type of section (tubes, I-sections, angles, channels, etc.), provided that suitable rollers are used for each type and height of section. Bending can be carried out about any axis of the section and the radii can vary along the length of the component.

Naprężenia te samorównoważą się w taki sposób, że suma naprężeń ściskających i rozciągających w danym przekroju elementu wynosi zero [8]. Naprężenia własne muszą spełniać następujące warunki równowagi:

$$\iint_A \sigma \cdot dA = 0 \quad (1)$$

$$\iint_A \sigma \cdot y \cdot dA = 0 \quad (2)$$

gdzie:

A – pole przekroju elementu;

σ – składowa naprężenia własnego normalna do przekroju A;

y – współrzędna określająca odległość od płaszczyzny neutralnej.

Niemal wszystkie procesy produkcyjne elementów stalowych powodują naprężenia własne w przekrojach tych elementów. Ponadto, naprężenia te mogą się pojawić w okresie eksploatacji elementu. Wyróżnia się następujące procesy, podczas których powstają naprężenia własne:

- 1) nierównomierne odkształcenie plastyczne – procesy technologiczne, które zmieniają kształt elementu, np. kucie, walcowanie, gięcie, ciągnięcie, rozciąganie, prostowanie, a także powierzchniowe odkształcenia materiału m.in. w łożyskach i szynach kolejowych;
- 2) modyfikacja powierzchni – szlifowanie, platerowanie, kulowanie, nawęglanie, a także korozja i utlenianie;
- 3) przemiany fazowe materiału lub zmiana gęstości – spawanie, odlewanie, hartowanie, utwardzanie, nierównomierne ogrzewanie lub chłodzenie.

Naprężenia własne można podzielić na trzy typy [9, 10]:

- typ I – makronaprężenia, równoważące się w objętości całego elementu; zakres tego typu naprężeń sięga od 1 mm wzwyż do granic całego przekroju elementu.
- typ II – naprężenia mikro, równoważące się w objętości pojedynczych ziaren metali polikrystalicznych;
- typ III – naprężenia, które występują w skali atomowej.

Znajomość naprężeń typu I najbardziej interesuje inżynierów budownictwa i większość technik pomiarowych pozwala je wyznaczyć.

Metody pomiarowe naprężeń własnych można podzielić na niszczące, półniszczące oraz nieniszczące. W artykule dokładnie opisano metodę otworkową (*hole-drilling method*) zaliczaną do metod półniszczących. Dokładny opis wszystkich metod przedstawiono w [9].

Formowanie na zimno

Formowanie na zimno elementów stalowych wykonywane jest zazwyczaj za pomocą trójpunktowego zginania. W praktyce maszyna do rolkowego gięcia na zimno jest wyposażona w cztery wałki – dwa zewnętrzne, jeden centralny i mniejszy wałek przytrzymujący pas i środek. W tej technologii zazwyczaj jedna z rolek skrajnych jest przemieszczana za pomocą siłownika w celu wygięcia belki (rysunek 1). Pierwszy fragment elementu poddanego gięciu, o długości równej odległości zewnętrznego wałka do wałka centralnego, pozostaje prosty i stanowi odpad odcinany po wygięciu całego elementu. Metodą tą może być gięty każdy rodzaj kształtownika (rury, dwuteowniki, kątowniki,

Previous research and studies

The first attempts to determine the natural stress distribution in a cold-bent component were made by Timoshenko in 1940 [11]. He proposed a theoretical model for the determination of the stresses developed after cold forming of materials, in which the final post-bending residual stresses result from the superposition of the stresses developed during loading and unloading of the component (Figure 2a).

In order to form the element, plasticisation must be achieved. Then, after relieving the load, the beam resiliently returns partially to its original position. The moment that causes the beam to plasticise is denoted by M_{pl} and the moment that arises after unloading, which is an elastic moment, is denoted by M_{sb} (spring back). These moments must ultimately balance each other:

$$M_{pl} + M_{sb} = 0 \quad (3)$$

$$f_y W_{pl} = -\sigma W_{sp} \quad (4)$$

where:

W_{pl} – plastic section modulus,
 W_{sp} – elastic section modulus.

The stresses developed in the extreme fibres during the action of M_{sb} are calculated according to the formula:

$$\sigma = -\frac{f_y W_{pl}}{W_{sp}} \quad (5)$$

while the stresses arising after stress relief according to the formula:

$$\sigma' = \left(\frac{W_{pl}}{W_{sp}} - 1\right) f_y = (\alpha - 1) f_y \quad (6)$$

It should be emphasised that, according to Timoshenko, the stresses developed in the outermost fibres depend only on the ratio of the plastic index of the cross-section to the elastic index and on the yield strength of the material. The model shown in Figure 2b, on the other hand, assumes a stress distribution with incomplete plasticisation under load and consequently a different distribution of stresses remaining after bending.

Tests on real I-beam members subjected to cold roll bending relative about the strong axis of inertia of the section are described in [6]. Poudre used the pinhole method to carry out tests on rolled components in S235 and S355 steel. The author noted that the results obtained

ceowniki itd.) pod warunkiem zastosowania odpowiednich rolek do każdego rodzaju i różnej wysokości kształtownika. Gięcie można wykonywać względem dowolnej osi kształtownika, a promienie mogą być różne po długości elementu.

Dotychczasowe analizy i badania

Pierwsze próby określenia rozkładu naprężeń własnych w elemencie giętym na zimno podjął Timoshenko w 1940 r. [11]. Zaproponował on teoretyczny model wyznaczenia naprężeń powstałych po formowaniu na zimno materiałów, w którym ostateczne naprężenia własne po gięciu wynikają z superpozycji naprężeń powstałych podczas obciążania i odciążania elementu (rysunek 2a).

W celu uformowania elementu należy doprowadzić do jego uplastycznienia. Następnie, po odciążeniu, belka sprężysto wraca częściowo do pierwotnego położenia. Moment powodujący uplastycznienie belki oznaczono M_{pl} , a moment powstający po odciążeniu, będący momentem sprężystym oznaczono M_{sb} („spring back”). Momenty te ostatecznie muszą się równoważyć:

$$M_{pl} + M_{sb} = 0 \quad (3)$$

$$f_y W_{pl} = -\sigma W_{sp} \quad (4)$$

gdzie:

W_{pl} – wskaźnik plastyczny przekroju;
 W_{sp} – wskaźnik sprężysty przekroju.

Naprężenia powstałe w skrajnych włóknach podczas działania M_{sb} oblicza się wg wzoru

$$\sigma = -\frac{f_y W_{pl}}{W_{sp}} \quad (5)$$

natomiast naprężenia powstałe po odciążeniu wg wzoru:

$$\sigma' = \left(\frac{W_{pl}}{W_{sp}} - 1\right) f_y = (\alpha - 1) f_y \quad (6)$$

Należy podkreślić, że wg Timoshenki naprężenia powstałe we włóknach skrajnych zależą jedynie od stosunku wskaźnika

plastycznego przekroju do wskaźnika sprężystego oraz od granicy plastyczności materiału. Model przedstawiony na rysunku 2b zakłada z kolei rozkład naprężeń przy niepełnym uplastycznieniu pod obciążeniem i w konsekwencji odmienny rozkład naprężeń pozostających po gięciu.

Badania na rzeczywistych, dwute-

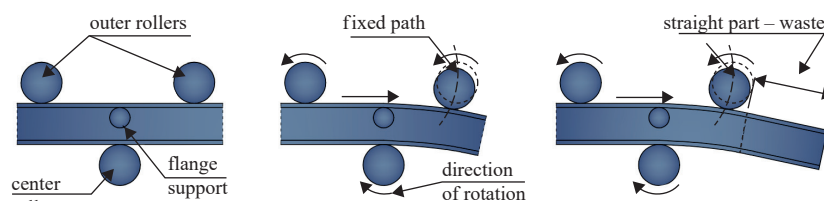


Fig. 1. Cold roll forming of a section

Rys. 1. Schemat rolkowego formowania na zimno kształtownika

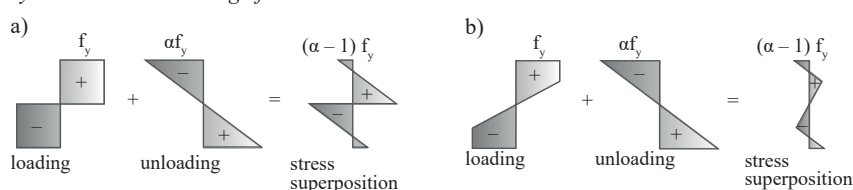


Fig. 2. Theoretical model for cold bending: a) according to Timoshenko [11]; b) with incomplete plasticisation

Rys. 2. Model teoretyczny gięcia na zimno: a) wg Timoshenki [11]; b) z niepełnym uplastycznieniem

did not coincide with the theoretical assumptions according to Timoshenko. Significant differences in stress values and a variable distribution after the width of the strips of the analysed section were observed compared to the theoretical model. The reason for the differences may be that Timoshenko's assumptions only applied to a bending rectangular section and are only correct for such a section, since in I-sections there is a change in stiffness after the width of the section and a large influence of the pressure of the shaft giving curvature. In addition, Timoshenko's analysis is based on the assumption of homogeneity of the material throughout the volume – the material characteristics are independent of the section location.

A continuation of the material tests from Poudre's work was carried out to determine the residual stress distribution in cold-bent components, as described in [7]. The method used to determine the residual stresses was to section the component (sectioning) into small fragments while continuously measuring the strain with strain gauges taped on two opposite walls of the sectioning. On the basis of extensive analyses, the authors proposed a model of the stress distribution for I-beams bent about the strong axis.

Figure 3 shows two stress models for bent I-sections about the strong axis of the section that appear in the literature – the Timoshenko model [11] and the Spoorenberg model [7]. The common feature of the presented models of the residual stress distributions is only the fact that these distributions after bending do not depend on the bending radius (degree of cold deformation of the steel), but only on the yield strength of the steel.

Own research

Preparation the elements for testing. A 12 m long HEB 320 section made of S460 M steel was subjected to cold roll bending according to the design (Figure 4). Four different bending radii were designed to achieve different levels of cold deformation in the steel. The table summarises the adopted bending parameters of the component along with the number of measurement points. For the analyses, the Degree of Cold Forming (DCF) and the degree of bending R/h (R – bending radius measured relative to the neutral axis of the section, h – height of the section) were determined. The initial and final sec-

owych elementach poddanych rolkowemu gięciu na zimno względem silnej osi bezwładności przekroju opisano w [6]. Poudre użył metody otworkowej do przeprowadzenia badań elementów walcowanych ze stali S235 i S355. Autor zauważył, że otrzymane rezultaty nie pokrywają się z założeniami teoretycznymi wg Timoshenki. Zaobserwowano znaczne różnice wartości naprężeń oraz zmienny rozkład po szerokości pasów analizowanego przekroju w stosunku do modelu teoretycznego. Przyczyną różnic może być to, że założenia Timoshenki dotyczyły wyłącznie zginanego przekroju prostokątnego i tylko w przypadku takiego przekroju są one poprawne, ponieważ w dwuteownikach występuje zmiana sztywności po szerokości przekroju i duży wpływ docisku wálka nadającego krzywiznę. Ponadto analiza Timoshenki bazuje na założeniu jednorodności materiału w całej objętości – charakterystyka materiału jest niezależna od miejsca przekroju.

Kontynuacją badań materiałowych z pracy Poudre były badania w celu określenia rozkładu naprężeń własnych w elementach poddanych gięciu na zimno, które opisano w [7]. Do określenia naprężeń własnych zastosowano metodę rozcinania elementu (*sectioning*) na małe fragmenty przy jednoczesnym ciągłym pomiarze odkształceń tensometrami naklejonymi na dwóch przeciwnych ściankach rozcinanego fragmentu. Na podstawie obszernych analiz autorzy zaproponowali model rozkładu naprężeń własnych w przypadku dwuteowników giętych względem silnej osi.

Na rysunku 3 przedstawiono dwa modele naprężeń własnych w przypadku dwuteowników giętych względem silnej osi bezwładności przekroju, które występują w literaturze – model Timoshenki [11] i Spoorenberga [7]. Cechą wspólną przedstawionych modeli rozkładów naprężeń własnych jest jedynie fakt, że rozkłady te po gięciu nie są uzależnione od promienia gięcia (stopnia odkształcenia stali na zimno), a jedynie od granicy plastyczności stali.

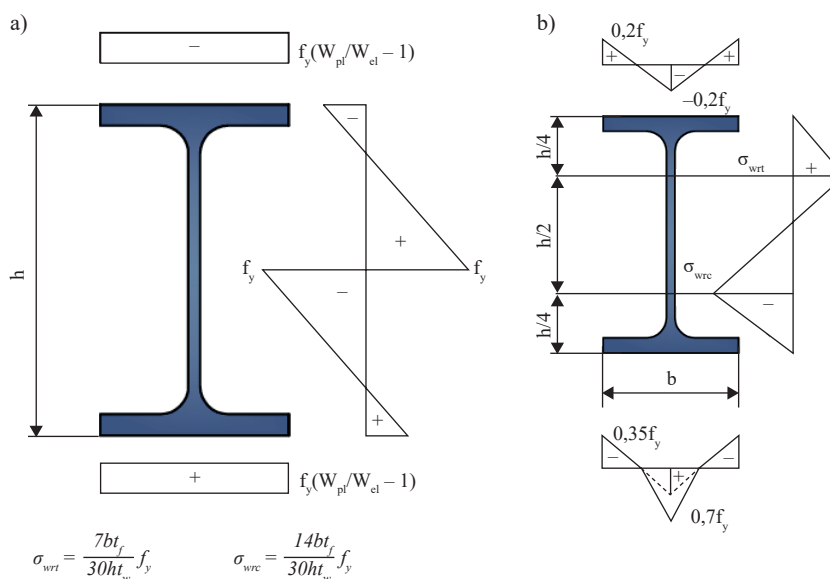


Fig. 3. Stress distribution models for I-beams after cold bending relative to the strong axis: a) Timoshenko 1940 [11]; b) Spoorenberg i in. 2011 [7]

Rys. 3. Modele rozkładów naprężeń własnych w przypadku dwuteowników po gięciu na zimno względem silnej osi: a) wg Timoshenki 1940 r. [11]; b) wg Spoorenberga i in. 2011 r. [7]

Badania własne

Przygotowanie elementów do badań. Kształtownik HEB 320 o długości 12 m wykonany ze stali S460 M poddano gięciu rolkowemu na zimno wg projektu (rysunek 4). Zaprojektowano cztery różne promienie gięcia w celu uzyskania różnych poziomów odkształcenia stali na zimno. W tabeli zestawiono przyjęte parametry gięcia elementu wraz

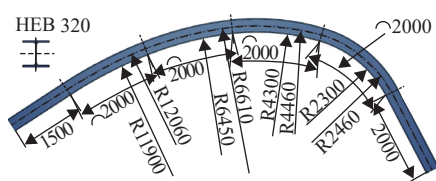


Fig. 4. Design of bending of HEB 320 section

Rys. 4. Projekt gięcia kształtownika HEB 320

Parameters adopted for material tests
Przyjęte parametry do badań materiałowych

Cross section	Steel grade	Bending radius [mm]	Degree of bending R/h [–]	DCF = $h/2R$ [%]	Number of measurement points		
					Flanges	Web	Total
HEB 320	S460M	2460	7,69	6,50	6	2	8
		4460	13,94	3,59	6	2	8
		6610	20,66	2,42	6	2	8
		12060	37,69	1,33	6	2	8

tions of the component were reference straight sections. The bending was carried out on a Roundo Roller R 62-S machine (Photo 1). The element after the bending process is presented in Photo 2. After the bending process, the element was cut into fragments of approx. 2 m in length, which were transported to the Accredited Building Construction Laboratory of the Faculty of Civil Engineering of Wrocław University of Technology for further testing.

The determination of the residual stresses was carried out for segments with bending radii of 2.46 m, 4.46 m, 6.61 m and a reference straight segment. In each segment, measurements were taken at eight points in the cross-section, three points each on the top and bottom flange and two points in the web. A total of 32 points were tested. The measuring points located on the flanges of the I-beam were made on the outside of these flanges due to restricted access during drilling.



Photo 1. Straight piece before bending
Photo: author
Fot. 1. Prosty element przed gięciem
Fot. autor



Photo 2. Test piece after bending
Photo: author
Fot. 2. Element badawczy po wygięciu
Fot. autor

The mechanism of trepanning method chosen for the measurements is to measure the deformation around the hole. The correctness of the results obtained in this way was verified by analysing the obtained rolling stresses of the reference elements [4]. The measurement was carried out using special strain gauge rosettes (TFrw-2/120). It is assumed that the change in strain values after the hole is made is a measure of the intrinsic stress at the point under test. During testing, the diameter of the drill bit used was 2 mm and the depth of the holes drilled was 2 mm – dimensions recommended in [8]. The determination of the residual stresses and the determination of correction factors, taking into account the off-centre drilling of the hole relative to the rosette, were carried out according to [12]. Photo 3a shows one of the measuring points after drilling, and Photo 3b shows an approximation of the measuring point before the hole was drilled.

The mechanism of the trepanning method chosen for the measurements is to measure the deformation around the hole. The correctness of the results obtained in this way was verified

z liczbą punktów pomiarowych. Na potrzeby analiz określono stopień odkształcenia na zimno DCF (*Degree of Cold Forming*) oraz stopień wygięcia R/h (R – promień gięcia mierzony względem osi obojętnej przekroju, h – wysokość całkowita przekroju). Początkowy oraz ostatni fragment elementu stanowiły referencyjne odcinki proste. Gięcie zostało wykonane na maszynie typu Roundo Roller R-62-S (fotografia 1). Element po procesie gięcia przedstawiono na fotografii 2. Po wykonaniu gięcia element został pocięty na fragmenty długości ok. 2 m, które przetransportowano do Akredytowanego Laboratorium Konstrukcji Budowlanych Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w celu dalszych badań.

Określenie naprężeń własnych przeprowadzono w przypadku segmentów o promieniach gięcia 2,46 m, 4,46 m, 6,61 m oraz referencyjnego segmentu prostego. W każdym segmen-

cie pomiary wykonano w ośmiu punktach w przekroju, po 3 punkty na pasie górnym i dolnym oraz 2 punkty w środku. Łącznie badanie przeprowadzono w 32 punktach. Punkty pomiarowe znajdujące się na pasach dwuteownika wykonano od zewnętrznej strony tych pasów ze względu na ograniczenie dostępu podczas wiercenia.

Mechanizm pracy wybranej do pomiarów metody otworowej (trepanacyjnej) polega na pomiarze odkształceń wokół nawiercanego otworu. Poprawność otrzymanych w ten sposób wyników zweryfikowano podczas analizy uzyskanych naprężeń walcowniczych elementów referencyjnych [4]. Pomiar był dokonywany przy użyciu specjalnych rozet tensometrycznych (TFrw-2/120). Przyjmuje się, że zmiana wartości odkształceń po wykonaniu otworu jest miarą naprężeń własnych w badanym punkcie. Podczas badań średnica zastosowanego wiertła wynosiła 2 mm, a głębokość wykonanych otworów 2 mm – wymiary zalecane w [8]. Wyznaczenie naprężeń własnych oraz określenie współczynników korekcyjnych, uwzględniających niecentryczne nawiercenie otworu względem rozety,

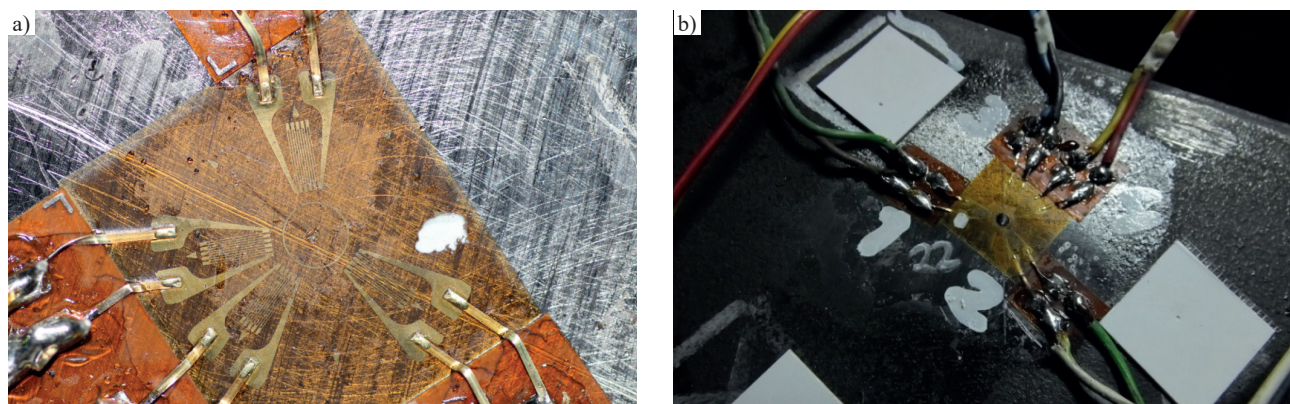


Photo 3. View of the rosette before drilling (a) and view of one measuring point (b)

Fot. 3. Widok rozety przed wykonaniem otworu (a) oraz widok jednego punktu pomiarowego (b)

by analysing the obtained rolling stresses of the reference elements [4]. The measurement was carried out using special strain gauge rosettes (TFRw-2/120). It is assumed that the change in strain values after the hole is made measures the residual stresses at the point under test. During testing, the diameter of the drill bit used was 2 mm and the depth of the holes drilled was 2 mm – dimensions recommended in [8]. The determination of the residual stresses and correction factors, considering the off-center drilling of the hole relative to the rosette, was carried out according to [12]. Photo 3a shows one of the measuring points after drilling, and Photo 3b shows an approximation of the measuring point before the hole was drilled.

Continuous strain measurements were carried out during drilling, by drilling a 2 mm deep hole until the strain readings stabilized, which took approximately 120 seconds after the hole was drilled. This time was important, also due to the need for the drilling area to cool down.

Analysis of results and summary

Figures 5 and 6 show selected results and distributions of normal stresses σ_x , (along the longitudinal x-axis of the section). They indicate the locations of the measurements in the sections and the measurement number by numerals. The selected determined stress values were related to the nominal yield strength of S460M steel $f_y = 460$ MPa. The stress markings were taken as ‘-’ compression, ‘+’ tension. The results for the reference straight element are presented in [4]. The red dashed line indicates the theoretical stress distribution according to the Timoshenko approach [11], while the blue dotted line indicates the stress model according to Spoorenberg [7], and the black dotted line indicates the combined values of the determined stresses to illustrate the distribution resulting from the measurements.

The intrinsic stresses in cold-rolled bent beams relative about the strong axis, which were determined in the study, have similar distributions (signatures) irrespective of the bending radius, but have completely different distributions than the rolling stresses in a straight member proposed in [13] and measured in [4], among others. The difference includes, among other things, a different marking and a different stress distribution in the bottom flange compared to the top flange. The residual stresses in the upper flange (stretched during roll

przeprowadzono wg [12]. Fotografia 3a przedstawia jeden z punktów pomiarowych po wykonaniu wiercenia, a na fotografii 3b zaprezentowano przybliżenie punktu pomiarowego przed nawierceniem otworu.

Prowadzono ciągły pomiar odkształceń w czasie wiercenia, poprzez nawiercenie otworu o głębokości 2 mm aż do ustabilizowania wskazań odkształceń, które trwało ok. 120 sekund po wykonaniu otworu. Czas ten był istotny, również ze względu na konieczność wystygnięcia obszaru wiercenia.

Analiza wyników i podsumowanie

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wybrane wyniki i rozkłady naprężeń normalnych σ_x , (wzdłuż osi podłużnej x kształownika). Oznaczono na nich miejsca pomiarów w przekrojach, a cyframi numer pomiaru. Wybrane wyznaczone wartości naprężeń odniesiono do nominalnej granicy plastyczności stali S460M $f_y = 460$ MPa. Znakowanie naprężeń własnych przyjęto jako „-” ściskanie, „+” rozciąganie. Wyniki dotyczące referencyjnego elementu prostego przedstawiono w [4]. Czerwoną linią przerywaną oznaczono teoretyczny rozkład naprężeń własnych wg podejścia Timoshenki [11], natomiast niebieską linią przerywaną model naprężeń wg Spoorenberga [7], a czarną linią kropkowaną połączone wartości wyznaczonych naprężeń w celu zobrazowania rozkładu wynikającego z pomiarów.

Naprężenia własne w belkach giętych rolkowo na zimno względem silnej osi, które wyznaczono w badaniach, charakteryzują się podobnymi rozkładami (znakowaniem) niezależnie od promienia gięcia, ale mają zupełnie odmienne rozkłady niż naprężenia walcownicze w elemencie prostym proponowane m.in. w [13] oraz pomierzone w [4]. Różnica obejmuje m.in. inne znakowanie oraz inny rozkład naprężeń w pasie dolnym w porównaniu z pasem górnym. Naprężenia resztkowe w pasie górnym (rozciągany podczas gięcia rolkowego), mają w większości analizowanych przypadków dodatnią wartość (rozciąganie). Rozkład naprężeń po szerokości pasa górnego jest również bardziej równomierny w porównaniu z pasem dolnym.

Największa osiągnięta wartość naprężeń w pasie górnym wynosiła ok. $0,95 f_y$ (rysunek 5), natomiast średnia wartość wynosiła ok. $0,5 f_y$. W pasie dolnym (ściskany podczas gięcia) naprężenia mają różne znaki i zdecydowanie największe war-

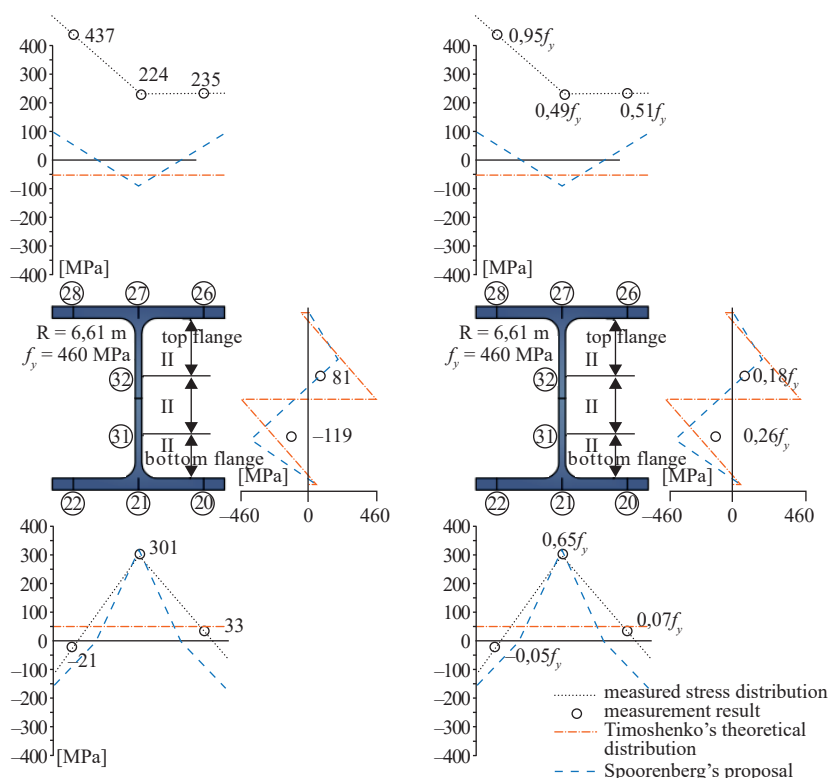


Fig. 5. Determined values of the residual stress σ_x after cold bending for component with radius $R = 6.61$ m

Rys. 5. Wyznaczone wartości naprężeń własnych σ_x po gięciu na zimno elementu o promieniu $R = 6,61$ m

bending), have a positive value in most of the cases analysed (stretching). The distribution of stresses across the width of the top flange is also more uniform compared to the bottom flange.

The highest stress value achieved in the top flange was about $0.95 f_y$ (Figure 5), while the average value was about $0.5 f_y$. In the bottom flange (compressed during bending), the stresses have different signs and by far the highest values are reached in the middle part of the flange – a tensile value of approx. $0.6 f_y$. In the outermost parts of the bottom flange, the stresses oscillate around zero after bending, with a maximum tensile stress of approx. $0.04 f_y$ (Figure 5) and a compressive stress of approx. $-0.24 f_y$ (Figure 6). A selection of test results is presented in this article, but the observations presented are valid for all bending radii.

The theoretical distributions proposed by Timoshenko do not coincide with experimental results. Closer to reality is the model proposed by Spoorenberg. The measurements of the bottom flange show satisfactory convergence with the Spoorenberg model, with differences of

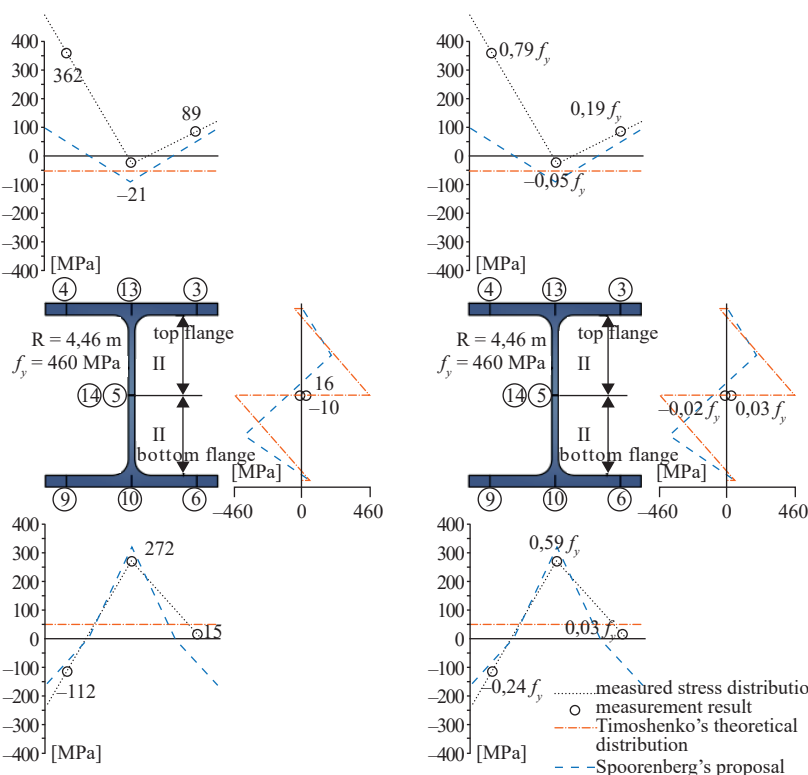


Fig. 6. Determined values of the residual stress σ_x after cold bending for component with radius $R = 4.46$ m

Rys. 6. Wyznaczone wartości naprężeń własnych σ_x po gięciu na zimno elementu o promieniu $R = 4,46$ m

tości osiągają w środkowej części pasa – rozciąganie o wartości ok. $0,6 f_y$. W skrajnych częściach pasa dolnego występują po gięciu naprężenia oscylujące wokół wartości zerowej przy maksymalnej wartości naprężeń rozciągających równej ok. $0,04 f_y$ (rysunek 5), a naprężeń ściskających równych ok. $-0,24 f_y$ (rysunek 6). W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań, ale przedstawione obserwacje dotyczą wszystkich promieni gięcia.

Teoretyczne rozkłady zaproponowane przez Timoshenkę nie pokrywają się z wynikami eksperymentalnymi. Bliższy rzeczywistości jest model zaproponowany przez Spoorenberga. Pomiary pasa dolnego wykazują zadowalającą zbieżność z modelem Spoorenberga – różnice wynoszą 10–15%. W przypadku pasa górnego stwierdzono pewne rozbieżności w środkowej jego części, co może wynikać m.in. z faktu, że nadawanie promienia gięcia wymaga kilkakrotnego przejazdu belki przez rolki maszyny formującej, a podczas formowania stosuje się zabiegi technologiczne (np. wkładki rozpierające pasy) zapobiegające deformacji przekroju.

10–15%. In the case of the top flange, some discrepancies were found in the middle part of the flange, which may be due, among other things, to the fact that giving the bending radius requires the beam to pass through the rollers of the forming machine several times, and during forming, technological treatments (e.g. flange spreader inserts) are used to prevent deformation of the section.

The Spoorenberg model requires a correction of the distribution in the case of the top flange, but, in order to propose our own modification of the model, more measurements would have to be made across the width of the flanges at different profiles and bending radiuses. It should also be noted that the test method used only determines the stresses on the outer side of the section at a chord depth of about 2 mm. It would have been reasonable to take measurements from both sides of the flange and determine an average value, as was carried out by the Spoorenberg team, which used the sectioning method.

The research indicates a different distribution of residual stresses after cold bending than for straight components. It therefore seems reasonable to carry out further research to determine the values of the residual stresses, the distribution of these stresses and their influence on the stability of the arches. The holedrilling method makes it possible to estimate the values of rolling (residual) stresses in steel elements and to determine their nature (compression, tension). However, it requires precision in execution, as the centricity and depth of hole drilling have a major impact on the results obtained. It is therefore reasonable to use dedicated measuring equipment for this method.

A summary of the analyses in the future will be the identification and formulation of guidelines for the modelling of curved elements in the analysis of building and engineering structures. Such research work has already been undertaken at the Wrocław University of Technology.

Received: 03.02.2025
Revised: 17.03.2025
Published: 22.05.2025

Model Spoorenberga wymaga korekty rozkładu w przypadku pasa górnego, ale, żeby zaproponować własną modyfikację modelu, konieczne byłoby wykonanie większej liczby pomiarów po szerokości pasów przy różnych profilach i promieniach gięcia. Należy również podkreślić, że zastosowana metoda badawcza określa naprężenia wyłącznie z zewnętrznej strony przekroju na głębokości pasa ok. 2 mm. Zasadne byłoby wykonanie pomiarów z obu stron pasa i wyznaczenie wartości średniej, tak jak to zostało przeprowadzone przez zespół Spoorenberga, który wykorzystał metodę rozcinania (*sectioning*).

Badania wskazują inny rozkład naprężeń własnych po gięciu na zimno niż w przypadku elementów prostych. Zasadne wydaje się zatem prowadzenie dalszych badań w celu określenia wartości naprężeń własnych, rozkładów tych naprężeń oraz ich wpływu na stateczność łuków. Metoda otworkowa pozwala oszacować wartości naprężeń walcowniczych (własnych) w elementach stalowych oraz określić ich charakter (ściskanie, rozciąganie). Wymaga jednak precyzji wykonania, ponieważ centryczność oraz głębokość nawiercenia otworu ma zasadniczy wpływ na uzyskane wyniki. Zasadne jest więc stosowanie dedykowanych urządzeń pomiarowych do tej metody.

Podsumowaniem analiz w przyszłości będzie określenie i sformułowanie wytycznych do modelowania elementów łukowych w analizach konstrukcji budowlanych i inżynierskich. Takie prace badawcze podjęto już na Politechnice Wrocławskiej.

Artykuł wpłynął do redakcji: 03.02.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 17.03.2025 r.
Opublikowano: 22.05.2025 r.

Literature

- [1] Marcinczak K. Gięcie na zimno wyrobów gorącawalcowanych. *Builder*. 2017, R. 21, nr 8, s.84–87 <https://doi.org/01.3001.0013.4271>
- [2] Skiadopoulou A, de Castro e Sousa A, Lignos DG. *Experiments and proposed model for residual stresses in hot-rolled wide flange shapes*, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 210 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108069>
- [3] Tankova T, Rodrigues F, Leitao C, Martins C, Simoes da Silva L. *Lateral-torsional buckling of high strength steel beams: Experimental resistance*. *Thin-Walled Struct* 2021;164:107913.
- [4] Marcinczak K, Lorenc W, Rowiński S. Pomiar naprężeń własnych w kształtowniku stalowym metodą otworkową. *Materiały Budowlane*. 2018; 4: 103–104, <https://doi.org/10.15199/33.2018.04.23>
- [5] Spoorenberg RC, Snijder H, Cajot L.-G, May M. *Experimental investigation on residual stresses in heavy wide flange QST steel sections*, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 89, pp. 63–74, 2013.
- [6] Poudre D. *Inelastic spatial stability of circular wide flange steel arches*, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven 2005.
- [7] Spoorenberg RC, Snijder H, Hoenderkamp J. *Proposed residual stress model for roller bent steel wide flange sections*, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, no. 6, pp. 992–1000, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.01.009>
- [8] Schajer Gary S, Rolfe ST. *Practical residual stress measurement methods*, John Wiley and Sons Ltd. 2013, <https://doi.org/10.1002/9781118402832>
- [9] Kudryavtsev YF. (2008) „Residual Stress” In: Sharpe, W. (ed) *Handbook of Experimental Solid Mechanics*. Springer: New York, pp 371 – 386, https://doi.org/10.1007/978-0-387-30877-7_15
- [10] Adamski M. *Naprężenia własne. Przykłady pomiarów ultradźwiękowych*, Biuro Gamma, Warszawa 1999.
- [11] Timoshenko S. *Strength of materials. Part II advanced theory and problems*, D. Van Nostrand Company, New York 1940.
- [12] Dudek K. Dokładność metody otworkowej w ocenie poziomu naprężeń własnych w elementach ustrojów nośnych maszyn roboczych, *Problemy Maszyn Roboczych*, tom Z. 24, 2004 r., s 17÷27
- [13] ECCS, Ultimate limit state calculations of sway frames with Brigid joint. Technical Working Group 8.2-System, European Convention for the Constructional Steelwork, Paris 1984